

# 重合格子法により地形表現を行う気象モデルへの雲微物理過程の実装

\*武村 一史, 重 尚一, 石岡 圭一 (京都大学大学院理学研究科)

## 1. はじめに

近年、計算機の発達に伴い気象モデルの高解像度化が進み急峻・複雑な地形が解像可能となった。従来の地形準拠座標系による地形表現ではそのような急峻・複雑な地形では格子が大きく歪み誤差が生じることが指摘されている。Satomura (1989)では地形に沿って数値的に生成した直交性が高く歪みの少ない格子 (一般座標系) を用いることで急峻地形の誤差の改善に成功している。しかし、一般座標系は崖のように斜度が急激に変化する地形では適切な格子の生成が困難であった。

我々はこれまでに、そのような複雑地形の表現を目的に重合格子法を用いた非静力学モデルを開発し、一般座標系では表現できない複雑地形の表現に成功した (Takemura et al. 2015)。しかし、重合格子法では物理過程の導入に問題が生じることが懸念される。本発表では重合格子法を採用した非静力学モデルへの雲微物理過程の導入可能性を検討する。

## 2. 重合格子法

重合格子法とは複数の格子を用いて計算領域を表現する手法であり、複雑境界があった場合に計算領域全体を表現する格子に加え、地形近傍を表現する格子を補助的に用いて複雑地形の表現を可能にする (図 1)。工学分野では飛行機やエンジンなどの複雑形状を表現するために用いられる手法であり、地球科学分野では Yin-Yang 格子 (Kageyama and

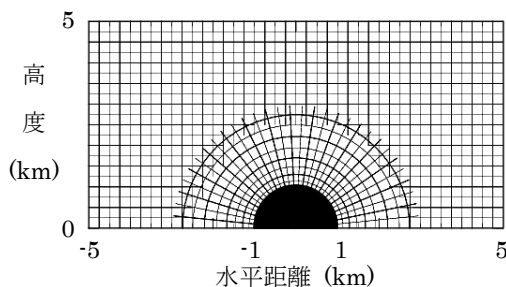


図 1: 山岳近傍の格子図。山岳近傍を表現する格子と領域全体を表現する格子との複数の格子を用いる。

Sato 2004)のように全球を均一な格子で表現をするために全球モデルにて用いられている。各格子間の情報交換は境界で変数を互いに補間することで行われる。例えば、格子 1 の境界値 (図 2. 黒四角) は周囲の格子 2 の値 (図 2. 白丸) から補間し、同様に格子 2 の境界値 (図 2. 黒丸) は周囲の格子 1 の値 (図 2. 白四角) から補間する。大気は鉛直方向に成層しているため、鉛直に補間すると誤差が大きくなると考えられる。そのため、非静力学モデルに導入するにあたり大気の成層性を考慮し、熱力学変数を基本場と擾乱成分に分け擾乱成分のみの補間を行っている。

## 3. 雲微物理過程の実装

雲微物理過程には簡単のために Kessler スキーム (Kessler 1969) を採用した。Kessler スキームでは水物質の混合比  $q_a$  ( $a = v: \text{vapor}, c: \text{cloud}, r: \text{rain}$ ) は移流項  $adv.$ 、各種変換項  $conv.$ 、雨滴の落下項  $fall$  により計算される。

$$\frac{\partial q_a}{\partial t} = adv. + conv. + fall$$

本モデルでは従来とは異なり座標系がデカルト座標系  $x^i$  から数値的に生成された座標系  $\xi^i$  へと座標変換されている。そのため、移流項  $adv.$  と雨滴の落下項  $fall$  には座標変換を施している。座標変換後の各項

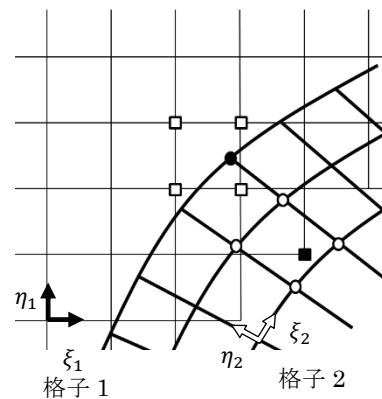


図 2: 重合格子法による格子間の補間の概念図。細実線、太実線は格子 1, 2 の各座標線を示す。黒四角は格子 1 の境界値、黒丸は格子 2 の境界値であり、白四角は黒丸の補間に用いる格子 1 の値、白丸は黒四角の補間に用いる格子 2 の値である。

はデカルト座標系 $x^i$ での風速の速度成分 $U^i$ 及び雨滴の終端落下速度 $U_r$ を用いた表記から数値的に生成された座標系 $\xi^i$ 上の風速の反変成分 $u^i$ 、雨滴の終端落下速度の反変成分 $u_r^i$ を用いた表記へと次式のように変換される。なお各種変換項 $conv.$ には座標変換が必要な項は含まれない。

$$adv. = -U^i \frac{\partial q_a}{\partial x^i} = -u^i \frac{\partial q_a}{\partial \xi^i}$$

$$fall = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho q_r U_r}{\partial z} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho q_r u_r^i}{\partial \xi^i}$$

また、重合格子法における実装では格子間の相互作用が必要である。これには、その他の変数と同様に各格子の境界条件として水物質の各混合比 $q_a$ を補間することにより行っている。Kesslerスキームの各項は境界条件として各変数の補間を行った後に計算される。

### 3. その他モデル概要

本モデルは運動方程式、連続の式、熱力学の式、状態方程式を支配方程式としている。方程式系は完全圧縮方程式系を用い、移流形式である。変数配置は格子の中心にスカラー値を格子の角に速度を配置している。格子間の補間は双線形補間を用いて行う。

### 4. 半円型山岳における雲微物理過程の検証実験

高さ 1000m の半円型山岳を越える一様流の設定のもとで雲微物理過程の検証実験を行った。初期条件として水平風速 10m/s、浮力振動数  $0.015s^{-1}$ 、相対湿度 95%を与えて 20 分間の時間積分を行った。格子間隔は水平、鉛直ともに 200m とし、重合格子法、一般座標系の各手法で計算し比較を行った。重合格子法の計算には図 2 のように山岳近傍では数値的に生成した格子、その他の領域はデカルト座標系を用いた。図 3 はそれぞれの手法による計算結果である。どちらの手法においても山岳風上側の地形性上昇流による地形性雲及び山岳下流の山岳波による雲を再現している。重合格子法による結果は一般座標系による結果と概ね一致した結果を得ることに成功した。

### 5. まとめ

複雑地形を表現可能な重合格子法を用いた非静力学モデルへ雲微物理過程を導入した。湿潤大気を用

いた検証実験の結果、重合格子法を採用した場合でも従来の雲微物理過程を導入することが可能であることが示された。

### 参考文献

- Kageyama, A. and T. Sato, 2004: "Yin-Yang grid": An overset grid in spherical geometry. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **5**, Q09005.
- Kessler, E. 1969: On the distribution and continuity of water substance in atmospheric circulation. *Meteor. Monogr.*, **10**, 88pp.
- Satomura, T., 1989: Compressible flow simulations on numerically generated grids. *J. Meteor. Soc. Japan*, **67**, 473-482.
- Takemura, K., K. Ishioka and S. Shige, 2015: Development of a non-hydrostatic atmospheric model using the Chimera grid method for a steep terrain. *Atmos. Sci. Lett.*, accepted

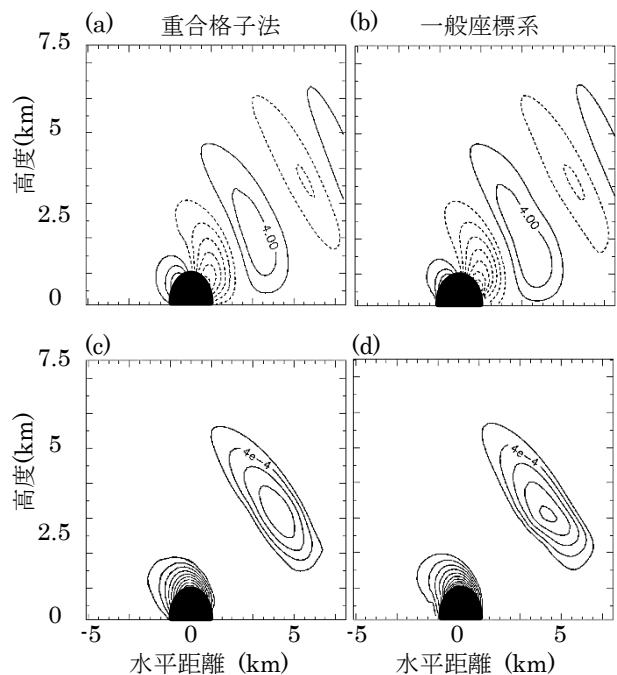


図 3 重合格子法と一般座標系による計算結果 (初期条件から 20 分後)。陰影部は山岳を表す。(a) 重合格子法による鉛直風速[m/s] (b) 一般座標系による鉛直風速鉛直風速[m/s]。等値線の間隔は 1m/s。点線は負の値を示す。(c) 重合格子法による雲水の混合比[kg/kg] (d) 一般座標系による雲水の混合比[kg/kg]。等値線の間隔は 0.05kg/kg。